Travail et énergie

Comment varie l'énergie d'un système mécanique ?

1) Comment définir le travail d'une force constante ?

1) Notion de force et de travail d'une force

Une force peut mettre en mouvement un objet, modifier son mouvement, le maintenir en équilibre ou le déformer. Une force est représentée par un vecteur caractérisé par sa direction, son sens, sa valeur et son point d'application qui est le point où l'on considère qu'elle s'exerce. Lorsque ces 3 premières caractéristiques ne varient pas au cours du temps, la force est dite **constante**.

En physique, le **travail** est une grandeur algébrique qui permet d'évaluer l'effet d'une force sur l'énergie d'un objet en mouvement. Le travail constitue un mode de transfert de l'énergie et s'exprime en joule (J).

→ activité : Travail d'une force

2) Travail d'une force constante

On considère une force F qui s'applique sur un objet se déplaçant rectilignement d'un point A à un point B.

Le travail $W_{AB}(\vec{F})$ d'une force constante $\vec{F}$ dont le point d'application se déplace de A à B est égal au produit scalaire du vecteur force $\vec{F}$ par le vecteur déplacement $\overrightarrow{AB}$.

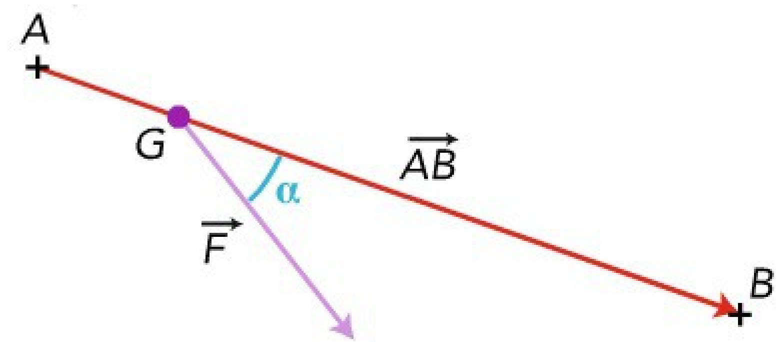
$$W_{AB}(\vec{F}) = \vec{F} \cdot \overrightarrow{AB} = F \cdot AB \cdot \cos\alpha$$

$W_{AB}(\vec{F})$ s'exprime en joule (J), F, la valeur de la force, en newton (N) et AB, le déplacement, en mètre (m).

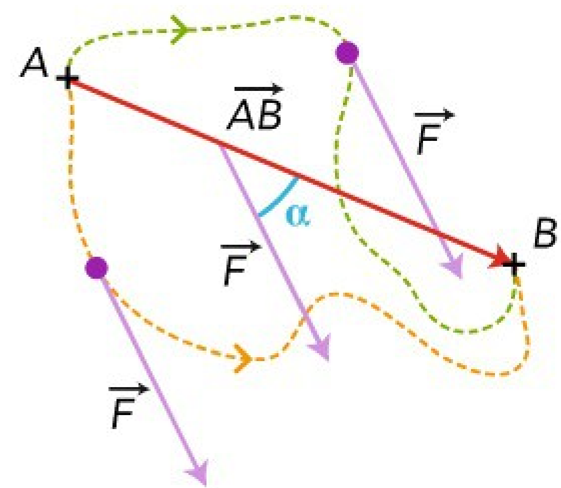
α désigne l'angle entre le vecteur force $\vec{F}$ et le vecteur déplacement $\overrightarrow{AB}$.

La définition du travail reste la même si le déplacement n'est pas rectiligne.

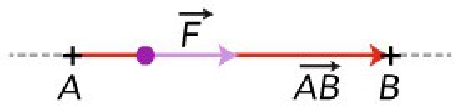
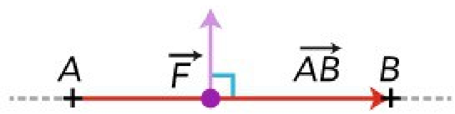
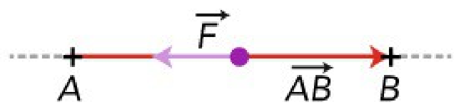
Si le travail d'une force est indépendant du chemin suivi, c'est à dire s'il ne dépend que des positions du point A et B, on dit que la force est **<u>conservative</u>**.
L'effet d'une force F sur le mouvement d'un objet est différent selon l'orientation de cette force par rapport à la direction et au sens du déplacement AB :



Doc. 1 **a.** Le vent exerce une force $\vec{F}$ considérée comme constante sur les voiles. **b.** Modélisation de cette force lors du déplacement rectiligne $\vec{AB}$.

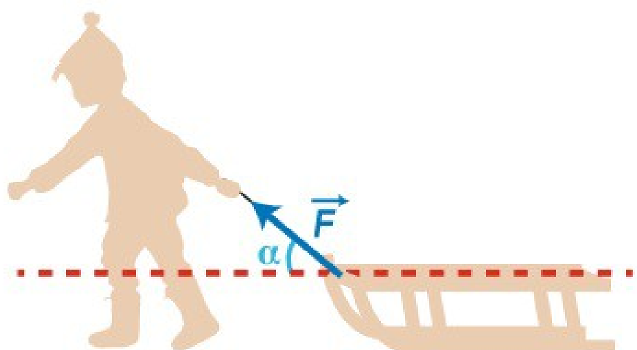


Doc. 2 Le travail d'une force constante $\vec{F}$ entre les points A à B est indépendant du chemin suivi.

$\alpha = 0°$ $\cos\alpha = 1$		$W_{AB}(\vec{F}) = F \cdot AB$ $W_{AB}(\vec{F}) > 0$	La force est parallèle à la trajectoire rectiligne et elle est dans le sens du mouvement. Le travail est positif ; il est dit **moteur**.
$\alpha = 90°$ $\cos\alpha = 0$		$W_{AB}(\vec{F}) = 0$	La force ne travaille pas quand son point d'application se déplace dans une direction perpendiculaire à celle de la force.
$\alpha = 180°$ $\cos\alpha = -1$		$W_{AB}(\vec{F}) = -F \cdot AB$ $W_{AB}(\vec{F}) < 0$	La force est parallèle à la trajectoire rectiligne et elle est opposée au sens du mouvement. Le travail est négatif ; il est dit **résistant.**

Exemple :

À l'aide d'une corde, Sylvain tire sa luge en ligne droite sur une distance AB de 200 m.
La force $\vec{F}$ exercée par la corde sur la luge fait un angle α de 40° par rapport à l'horizontale. Elle garde une valeur constante de 45 N.



1. Donner l'expression du travail de la force $\vec{F}$ au cours du déplacement $\overrightarrow{AB}$.
2. Calculer sa valeur.

1. $W_{AB}(\vec{F}) = \vec{F} \cdot \overrightarrow{AB} = F \cdot AB \cdot \cos\alpha$
2. $W_{AB}(\vec{F}) = 45 \times 200 \times \cos 40 = 6{,}9 \times 10^3$ J

3) Travail du poids

Dans un champ de pesanteur $\vec{g}$ considéré comme uniforme, le poids d'un objet de masse *m* est une force constante.
On considère un objet se déplaçant dans un référentiel terrestre, auquel est associé un repère $(O; \vec{i}, \vec{k})$ dont l'axe vertical est orienté vers le haut

Un objet de masse *m*, placé dans un champ de pesanteur uniforme $\vec{g}$, est soumis à son poids, dont le point d'application est le centre de gravité de l'objet.
Lorsque le centre de gravité se déplace d'un point *A* à un point *B*, le travail du poids est donné par la relation :

$$W_{AB}(\vec{P}) = \vec{P} \cdot \overrightarrow{AB} = P \cdot AB \cdot \cos \alpha ; \qquad \text{or,} \qquad \cos \alpha = \frac{(z_A - z_B)}{AB}$$

D'où : $W_{AB}(\vec{P}) = P \cdot (z_A - z_B)$

$$\boldsymbol{W_{AB}(\vec{P}) = m \cdot g \cdot (z_A - z_B)}$$

$W_{AB}(\vec{P})$ s'exprime en joule (J), *m*, la masse du mobile, en kilogramme (kg), *g*, l'intensité du champ de pesanteur, en newton par kilogramme ($m \cdot s^{-2}$) et $(z_A - z_B)$, la différence d'altitudes entre *A* et *B*, repérées sur un axe (*Oz*) orienté vers le haut, en mètre (m).

Dans un champ de pesanteur uniforme, le travail du poids d'un objet ne dépend que des altitudes du point de départ et d'arrivée. <u>Le poids est une force conservative.</u>

<u>4) Travail d'une force électrostatique</u>

Dans un champ électrostatique uniforme $\vec{E}$, la force électrostatique $\vec{F} = q \cdot \vec{E}$ qui s'exerce sur une particule de charge q assimilée à un point matériel est constante

Lorsque la particule se déplace d'un point A à un point B, le travail de la force électrostatique est donné par la relation :

$$W_{AB}(\vec{F}) = \vec{F} \cdot \overrightarrow{AB} = q \cdot \vec{E} \cdot \overrightarrow{AB} = q \cdot E \cdot AB \cdot \cos \alpha$$

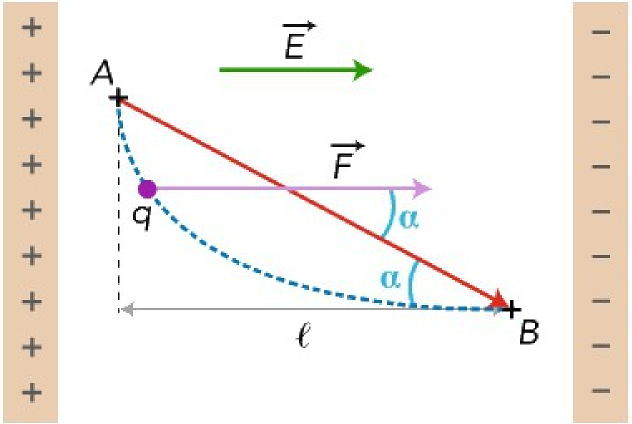
Comme on l'a vu en classe de Première S, la valeur du champ électrostatique entre deux armatures P et N dépend de la tension U_{PN} entre ces armatures et de la distance d qui les sépare :

$$E = \frac{U_{PN}}{d}$$

Cette relation reste valable pour des points A et B qui appartiennent à l'espace situé entre les armatures. Dans ce cas :

$$\ell = AB \cdot \cos \alpha \text{ (doc. 4)} \qquad \text{et} \qquad W_{AB}(\vec{F}) = q \cdot E \cdot \ell = q \cdot U_{AB}$$

où $U_{AB} = E \cdot AB \cdot \cos \alpha$ est la tension entre les points A et B.



Doc. 4 Force électrostatique $\vec{F}$ constante qui s'exerce sur une particule de charge positive q se déplaçant de A à B.

Une particule de charge q placée dans un champ électrostatique uniforme $\vec{E}$ est soumise à une force électrostatique $\vec{F}$.
Lorsque cette particule se déplace d'un point A à un point B, le travail de la force à laquelle elle est soumise est donné par la relation :

$$W_{AB}(\vec{F}) = \vec{F} \cdot \overrightarrow{AB} = q \cdot \vec{E} \cdot \overrightarrow{AB} = q \cdot E \cdot AB \cdot \cos \alpha$$

$$\boldsymbol{W_{AB}(\vec{F}) = q \cdot U_{AB}}$$

$W_{AB}(\vec{F})$ s'exprime en joule (J), q, la charge de la particule, en coulomb (C) et U_{AB}, la tension électrique entre les points A et B, en volt (V).

Dans un champ électrostatique uniforme, le travail de la force électrostatique à laquelle est soumise une particule ne dépend que des positions de son point de départ et d'arrivée.
<u>La force électrostatique est une force conservative.</u>

5) Force non conservative : cas des forces de frottements

On se limite à l'étude d'un mouvement rectiligne au cours duquel l'intensité de la force de frottement reste constante.

Lors d'un mouvement rectiligne de longueur AB, le travail d'une force de frottement $\vec{f}$ d'intensité constante est donné par la relation :

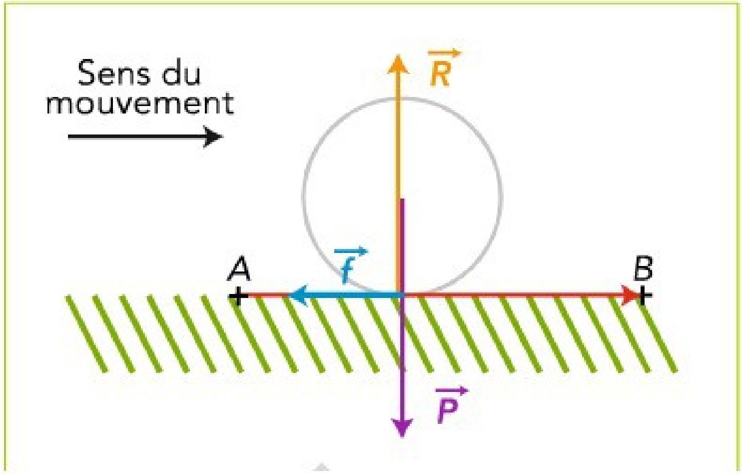
$$W_{AB}(\vec{f}) = \vec{f} \cdot \overrightarrow{AB}$$

$W_{AB}(\vec{f})$ s'exprime en joule (J), f, en newton (N) et AB, en mètre (m).

La force de frottement $\vec{f}$ étant généralement de sens opposé au vecteur déplacement $\overrightarrow{AB}$, cette relation devient :

$$\mathbf{W_{AB}(\vec{f}) = -f \cdot AB < 0}$$

On dit que ce travail est **résistant**.



Dans le cas particulier où la force $\vec{f}$ est de même sens que le vecteur déplacement $\overrightarrow{AB}$, $W_{AB}(\vec{f}) = f \cdot AB > 0$. On dit alors que le travail est moteur.

Le travail de la force de frottement pendant un déplacement $\overrightarrow{AB}$ dépend du chemin suivi : **la force de frottement** est une **force non conservative**.

2) Comment s'effectuent les transferts énergétiques ?

1) Forces conservatives et énergies potentielles

A toute force conservative est associé une énergie appelée énergie potentielle. Il y a par exemple, l'énergie potentielle de pesanteur, l'énergie potentielle électrique.

Dans le cas de la force de pesanteur :

$$W_{AB}(P) = m \cdot g \cdot (z_A - z_B) = \mathbf{m \cdot g \cdot z_A - m \cdot g \cdot z_B}$$

Avec l'axe (Oz) orienté vers le haut.
Or l'énergie potentielle de pesanteur d'un système de masse m, dont le centre de gravité est à l'altitude z est définie par :

$$\mathbf{E_{pp} = m \cdot g \cdot z}$$

Avec à l'altitude choisie comme référence, $E_{pp} = 0$

On a donc

$$\mathbf{W_{AB}(P)} = E_{ppA} - E_{ppB} = -(E_{ppB} - E_{ppA}) \mathbf{= -\Delta E_{pp}}$$

ΔE_{pp} est la variation d'énergie potentielle de pesanteur entre le point de départ A et le point d'arrivée B.
Donc, le travail du poids d'un système se déplaçant entre deux points est l'opposé de la variation de son énergie potentielle de pesanteur entre ces deux points.

Dans le cas de la force électrostatique :

$$W_{AB}(F) = q \cdot U_{AB}$$

Où U_{AB} est la tension électrique entre A et B appelée aussi différence de potentiel ΔV et s'exprime sous la forme :

$$U_{AB} = V_A - V_B$$

$$\text{Ainsi } \mathbf{W_{AB}(F) =} q \cdot U_{AB} = q \cdot (V_A - V_B) = \mathbf{q \cdot V_A - q \cdot V_B}$$

Or l'énergie potentielle électrique d'une particule de charge q en un point de potentiel V est définie par :

$$\mathbf{E_{pé} = q \cdot V}$$

On a donc

$$\mathbf{W_{AB}(F)} = E_{péA} - E_{péB} = - (E_{péB} - E_{péA}) \mathbf{= - \Delta E_{pé}}$$

$\Delta E_{pé}$ est la variation d'énergie potentielle électrique entre le point de départ A et le point d'arrivée B.

Donc, le travail de la force électrostatique exercée sur une particule se déplaçant entre deux points est l'opposé de la variation de son énergie potentielle électrique entre ces deux points.

Conclusion : La variation d'énergie potentielle d'un système se déplaçant d'un point A à un point B est égale à l'opposé du travail effectué par les forces conservatives de somme F qui s'exercent sur ce système :

$$\Delta E_p = E_{pB} - E_{pA} = - W_{AB}(F)$$

2) Conservation de l'énergie mécanique

→ T.P. : Étude énergétique des oscillations libres d'un pendule

Si les frottements sont négligeables, il y a conservation de l'énergie mécanique.

Lorsqu'un système est soumis à des forces conservatives et/ou à des forces non conservatives dont le travail est nul, son énergie mécanique E_m se conserve.

La variation d'énergie mécanique ΔE_M au cours du mouvement est donc nulle :

$$\mathbf{\Delta E_M = \Delta E_C + \Delta E_p = 0} \text{ donc } \mathbf{\Delta E_C = -\Delta E_p}$$

Lorsqu'il y a conservation de l'énergie mécanique, il y a transfert total de l'énergie potentielle en énergie cinétique ou inversement.

3) Non conservation de l'énergie mécanique

Si les frottements ne sont pas négligeables, il n'y a pas conservation de l'énergie mécanique.

Lorsqu'un système est soumis à des forces conservatives et/ou à des forces non conservatives qui travaillent, son énergie mécanique E_m ne se conserve pas ; sa variation est égale au travail des forces non conservatives.

La variation d'énergie mécanique ΔE_M au cours du mouvement est donc :

$$\mathbf{\Delta E_M = W(f)}$$

Avec f la résultante des forces non conservatives.

Lorsqu'il y a **non conservation** de l'énergie mécanique, il y a transfert **partiel** de l'énergie potentielle en énergie cinétique ou inversement.

→ activité doc. : Mesure du temps et définition de la seconde : la quête de la précision

Les frottements sont qualifiés de **dissipatifs**, car ils sont à l'origine d'une diminution de l'énergie mécanique. Il est impossible d'utiliser un tel système mécanique pour définir la seconde, car son évolution n'est plus périodique. C'est pourquoi, depuis 1967, la définition de la seconde est élaborée à l'aide d'horloges atomiques.